

# Măsurarea tensiunilor



## Cuprins

- A. Procesul de măsură – generalități; erori de măsură
  - procesul de măsură; clasificări și definiții
  - unități de măsură
  - erori de măsură
- B. Măsurarea tensiunilor continue
  - schema generică a unui voltmetru de c.c.
  - instrumentul magnetoelectric
  - voltmetre și ampermetre cu instrument magnetoelectric
- C. Măsurarea tensiunilor alternative
  - parametri și valorile particulare ale semnalelor periodice
  - detectoare; voltmetre pentru fiecare din valorile particulare
  - voltmetre gradate în valori efective, indiferent de valoarea măsurată

A. Procesul de măsură – generalități; erori de măsură

## Procesul de măsură

Componente:

1. Obiectul de măsură (măsurandul)
2. Metoda de măsură
3. Aparatul de măsură
4. Etalonul

## 1. Obiectul de măsură (măsurandul)

- O mărime măsurabilă trebuie să se constituie ca o mulțime ordonată
- Măsurandul poate fi o mărime:
  - Activă, cu energie proprie  $W_x$  : se preia o fracțiune  $W_m \ll W_x$   
OBS: Remember Heisenberg?  
Ex: măsurarea U
  - Pasivă, fără energie proprie  
se aplică din exterior o energie de activare  $W_{act}$ , se măsoară răspunsul  $W_m$   
OBS: trebuie ca  $W_{act}, W_m \ll W$  internă  
Ex: măsurarea R

## 2. Metoda de măsură

Metode:

- **Directe:**  
Etalonul există implicit în funcția de prelucrare  
Ex: măsurarea U, I cu voltmetrul/ampermetrul
- **De comparație:**  
Prelucrarea simultană/sucesivă a măsurandului și etalonului prin 2 funcții de măsură  
Ex: măsurarea tensiunii prin comparație cu altă tensiune
- **Indirecte:**
  - Se măsoară prin una din metodele de mai sus alte mărimi decât cea dorită;
  - Se obține mărimea dorită prin calculEx: măsurarea  $R=U/I$

### 3. Aparatul de măsură

- Este materializarea metodei de măsură
- transformă mărimea măsurată  $x$  în ieșirea  $y=f(x)$
- $f(x)$  : *caracteristică de transfer*
  - ideală:  $y=f(x)$
  - reală:  $y=f(x, x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pn})$
- aparat analogic:  $f(x)$  continuă
- aparat numeric/digital:  $f(x)$  discret (cuantizat)
- Avantaje aparat numeric:
  - elimină erori de citire, paralaxă, etc
  - posib. de automatizare
  - rezoluție mult mai bună; Ex:  $U_{CS}=1.999V \rightarrow$  se pot citi 1999 valori distincte; **încercați să desenați o scară analogică cu 1999 diviziuni !**
- Avantaje aparat analogic
  - lipsa erorii de cuantizare **Q: comparați cu cuantizarea pe scara de 1.999V**
  - flexibilitate în desenarea și marcarea limitelor scării (**remember zona roșie?**)
  - se pot desena scări neliniare, după orice lege de variație se dorește

### 4. Etalonul

Este legat de sistemul de unități de măsură folosit

Sistemul SI (Sistemul Internațional de Unități - 1960)

– 7 mărimi de bază, din care se derivă celelalte mărimi:

- metrul – m pentru distanță,
- kilogramul – kg pentru masă,
- secunda – s pentru timp,
- amperul – A pentru curentul electric,
- gradul Kelvin – K pentru temperatură,
- candela – cd pentru intensitatea luminoasă,
- molul – mol pentru cantitatea de substanță

## 4. Etalonul – cont'd

Poate fi:

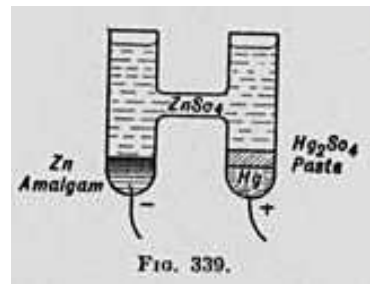
- **obiect fizic**  
ex. metrul, voltul
- **fenomen fizic**  
ex: secunda, ulterior metrul, voltul, etc

etalonul ca obiect fizic: dezavantaje evidente

### Etaloane ca obiecte fizice



metrul

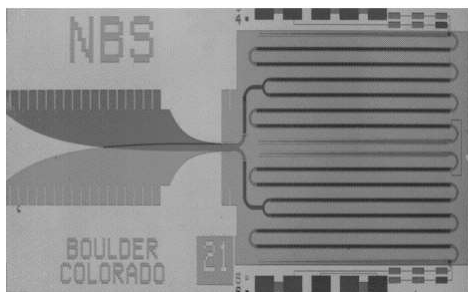


celula Clark

- metrul: 1889-1960, bară de platină-iridiu menținută la 0°C la Biroul de Măsuri și Greutăți din Sevres, Franța
- voltul: celula Clark (1873): 1.434V la 15°C sau celula Weston (1893): 1.0190V într-o gamă mai largă de temperaturi
- Q: de ce sînt considerate nepractice?

## Etaloane ca fenomene fizice

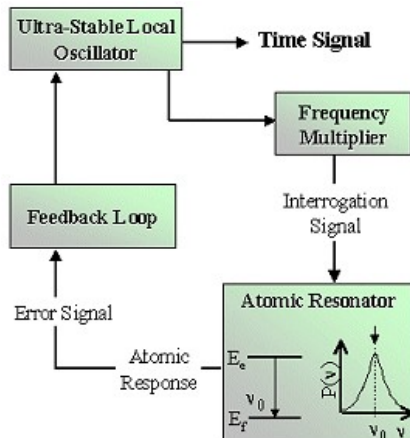
- 1983: 1m= spațiul parcurs de lumină în 1/299 792 458 dintr-o secundă
- 1990: 1V se definește în joncțiunea Josephson K{J-90} = 0.4835979 GHz/ $\mu$ V la temperatura de -90°C (heliu lichid); 1Hz=1/secundă



- se observă că toate depind de etalonul de timp (s)

## Etalonul pentru secundă

- pre-1960: ceasuri mecanice, electrice sau electronice
- 1960: 1 / 31 556 925.9747 din durata anului tropical 1900
- 1967: durata a 9 192 631 770 perioade ale radiației corespunzătoare tranziției între 2 nivele hiperfine ale atomului Cs<sup>133</sup> la nivelul mării și la temperatura 0 K (ceas atomic cu cesiu)

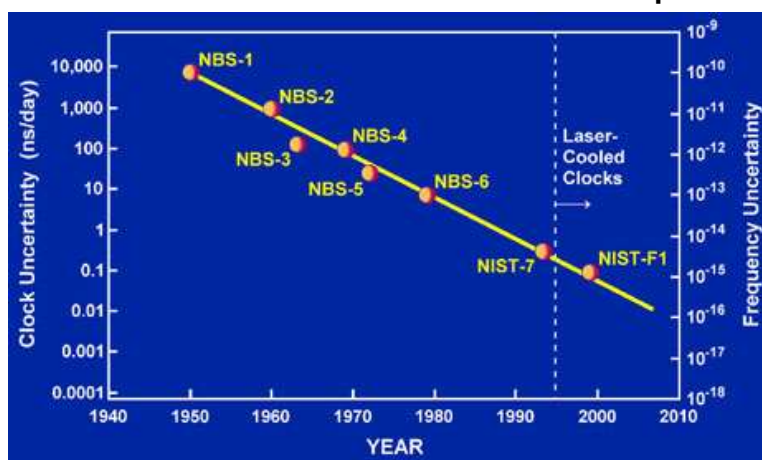


sursa: National Research Council of Canada

## Evoluția preciziei etaloanelor de timp

Perioada	Ceasuri disponibile	Precizia pe zi
4000 ani BC	Sumerienii împart ziua și noaptea în 12+12 ore	
Înainte de 1280	Ceasuri solare, ceasuri cu apă, clepsidre	~ 1h
~ 1280	Primul ceas mecanic	~ 30-60 min
~ sec. XIV	Inventarea mecanismului regulator ( <i>engl. escapement</i> )	~ 15-30 min
1345	Ora împărțită în minute și secunde	
Sec. 15	Aplicarea ceasurilor în viața omului, în special pt. stabilirea orelor de muncă	~ 2 min
Sec. 16	Ceasurile folosite în știință, de exemplu Galileo măsoară timpul de cădere al unor obiecte	~ 1 min
1656	Ceasul cu pendulă (Huygens)	~ 100s
Sec. 18	Ceasul cu pendulă compensat cu temperatura	1-10s
Sec. 19	Ceasuri electrice bazate pe pendul	$10^{-2} - 10^{-1}$ s
1910-1920	Ceasurile de mână devin uzuale	
1920-1934	Ceasuri electrice cu rezonator	$10^{-3} - 10^{-3}$ s
1921	Ceasuri electronice cu cristal de cuarț (inclusiv ceasuri de mână începând cu ~ 1970)	$10^{-5} - 10^{-1}$ s
1949	Ceasuri atomice cu cesiu, rubidiu, hidrogen etc	$< 10^{-4}$ s

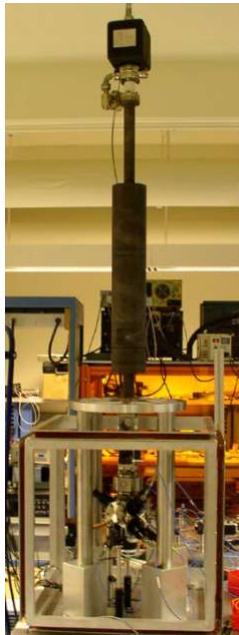
## Precizia etalonului de timp



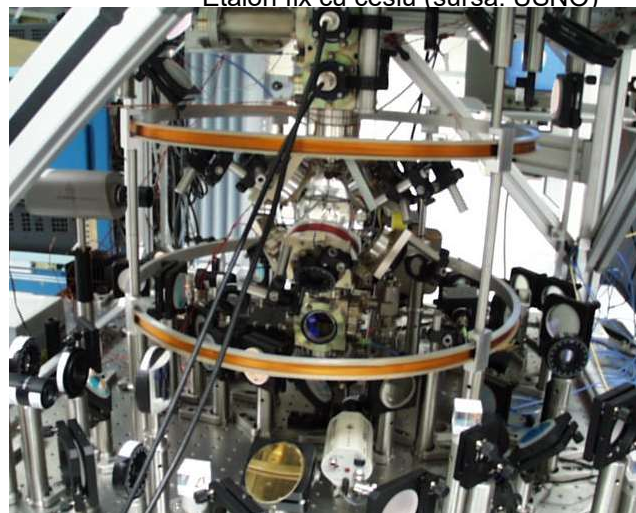
sursa: NIST (National Institute of Standards and Technology)

precizia etaloanelor atomice:  $10^{-9} \dots 10^{-16}$   
 (etalonul de timp e cel mai precis etalon)

## Etaloane de timp - fixe



Etalon fix cu rubidiu (sursa: USNO)



Etalon fix cu cesiu (sursa: USNO)

## Etaloane de timp - pentru rack



Etalon portabil cu cesiu (rack-mounted) Symmetricom Cs4000

- ieșire PPS (*Pulse Per Second* = 1Hz), 100KHz, 1, 5, 10MHz
- opțional, sincronizare cu GPS

Exemplu de rezonator atomic cu rubidiu

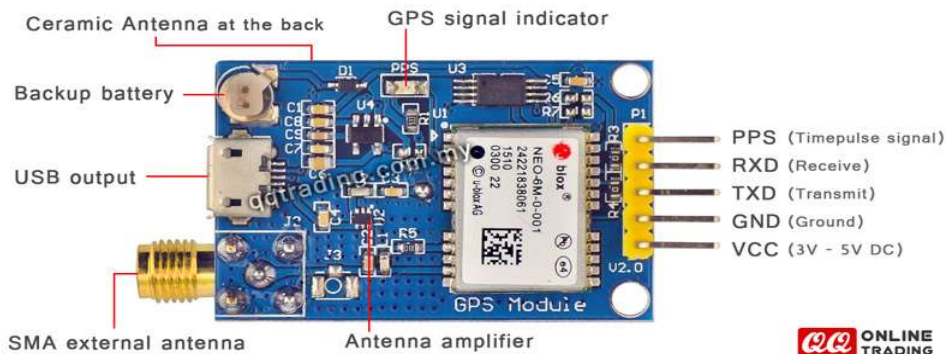
<https://youtu.be/I55uLRRvLCU>

Doar pt. cunoscători: explicarea funcționării și repararea unui rezonator atomic cu cesiu HP5061A:

<https://www.youtube.com/watch?v=kKkMxEyoeo4>



## Etaloane de timp bazate pe receptor GPS



sistemul GPS:

- 4 ceasuri atomice /satelit (2 cu cesiu, 2 cu rubidiu) pt. redundanță
- precizie la bordul satelitelui:  $10^{-13}$
- erori la sol datorită propagării și procesării; se ajunge la o precizie de ordinul 10ns (coresp. unei precizii în distanță de cca. 3m). Impulsul PPS are o precizie între 100 și 1000ns.

## Erori de măsură: 2 reguli esențiale

- Regula 0-1:

Dacă operatorul nu poate influența erorile (cazul erorilor aleatoare), la calculul erorilor se alege **situația cea mai defavorabilă**

- Regula 0-2:

Dacă operatorul poate influența erorile (cazul alegerii metodei de măsură și a parametrilor), la calculul erorilor se alege **situația cea mai favorabilă**

**Justificare!**

## Exprimarea cantitativă a erorilor

- erori absolute

$$e = X_m - X$$

- erori relative

$$\varepsilon_r = \frac{e}{X} = \frac{X_m - X}{X}$$

- erori raportate (Q: la cine?)

$$\varepsilon_R = \frac{e}{X_R} = \frac{X_m - X}{X_R}$$

unde:  $X$  - valoarea adevărată     $X_m$  - valoarea măsurată

- OBS: uneori - exprimare în modul

## Clasa de precizie

$$C = \varepsilon_R \Big|_{X_R=X_{CS}} [\%] = \frac{e}{X_{CS}} \cdot 100 [\%]$$

Observații:

- Clasa de precizie este eroarea **procentuală raportată la capul de scară**  $X_{CS}$
- Fabricantul determină și indică în prospect clasa de precizie în urma unor măsurători repetate, efectuate cu un aparat cu C de cel puțin 10 ori mai mic
- Clasa de precizie e întotdeauna în procente, chiar dacă se omite semnul [%]
- Clasa de precizie specifică o eroare **constantă** în gama de măsură

*deci: e (eroarea absolută) aceeași pentru  $X_m$  mari sau mici*

$$e = C \cdot X_{CS}$$

## Categorii de erori; eroarea limită

două categorii de fenomene diferite duc la 2 categorii diferite de erori:

1. erori **constante** în gama de măsură: se preferă exprimarea erorii **raportată la  $X_{CS}$** 
  - exemplu pt. aparate electromecanice ?
  - exemplu pt. aparate electronice în general ?
  - exemplu pt. aparate digitale ?
  - **exprimare absolută:  $e = CX_{CS}$**
2. erori **proporționale** cu valoarea măsurată: se preferă exprimarea **relativ la  $X$** 
  - exemplu ?
  - **exprimarea absolută:  $e = \epsilon_r X$**

Eroarea **limită** este suma erorilor datorate celor 2 cauze;  
exprimare sub formă absolută: (1) + (2):

$$e_{\text{lim}} = CX_{CS} + \epsilon_r X$$

## Eroarea limită - expr. absolută

Exemplu: extras din manualul multimetrului de precizie Agilent 34401:

**Accuracy Specifications**  $\pm$  ( % of reading + % of range )

Function	Range [ 3 ]	Test Current or Burden Voltage	24 Hour [ 2 ] 23°C $\pm$ 1°C	90 Day 23°C $\pm$ 5°C	1 Year 23°C $\pm$ 5°C
DC Voltage	100.0000 mV		0.0030 + 0.0030	0.0040 + 0.0035	0.0050 + 0.0035
	1.000000 V		0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0040 + 0.0007
	10.00000 V		0.0015 + 0.0004	0.0020 + 0.0005	0.0035 + 0.0005
	100.0000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0045 + 0.0006
	1000.000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0010	0.0045 + 0.0010

Q1: identificați termenii din formula erorii limită

Q2: cât este eroarea limită absolută la măsurarea unei tensiuni  $U_x = 2V$  cu acest aparat, la un an de la calibrare ?

A2:  $0.00007V + 0.00005V = 0.00012V = 0.12mV$

Q3: cât este rezoluția pe scara respectivă? rezoluția *bună* e mică sau mare?

Q4: determinați clasa de precizie a aparatului ! pe care din cele 2 valori din tabel o folosiți?

Q5: de ce clasa de precizie e mai mare (mai proastă) pe scara de 100mV ?

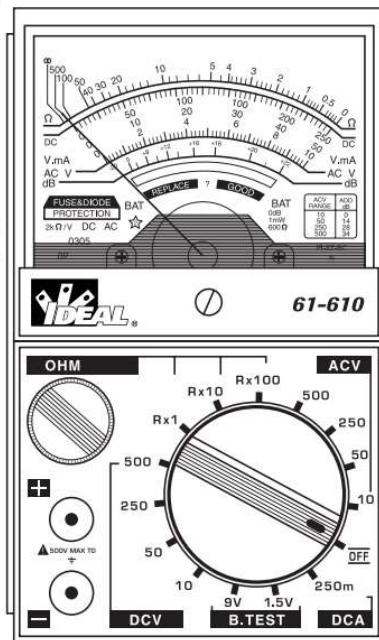
## Eroarea limită - expr. absolută

Exemplu multimetru analogic:

### Ranges & Accuracies:

AC Voltage:	10/50/250/500 ACV	+/-4% FS
DC Voltage:	10/50/250/500 DCV	+/-3% FS
DC Current:	250 mA DC	+/-4% FS
Resistance:	5/50/500 $\Omega$ Mid-scale	+/-3% of Arc Length
	1k/10k/100k $\Omega$ Full-scale	+/-3% of Arc Length
Decibels:	-20 to +56 dB on ACV ranges	

- Q1: care termen din formula erorii limită lipsește?  
 Q2: cât e clasa de precizie la măsurarea U ?  
 Q3: cât e clasa de precizie la măsurarea R ?  
 Q4: cât este rezoluția pe scara 10V?  
 comparați cu rezoluția aparatului numeric Agilent 34401 !



## Eroarea limită - expr. absolută

Exemplu multimetru numeric GW-Instek GDM-8246 (lab METc):

1. DC VOLTAGE OR DCV OF RIPPLE FUNCTION			
RANGE	RESOLUTION	ACCURACY	INPUT IMPEDANCE
500mV	10 $\mu$ V	0.02%+4	10M $\Omega$
5V	100 $\mu$ V		11.1 M $\Omega$
50V	1mV		10.1M $\Omega$
500V	10mV		10M $\Omega$
1000V	100mV		10M $\Omega$

- Q1: ce înseamnă acel "+4" ? comparați cu Agilent 34401 unde este "+ xx % of range"; este tot o mărime ct. în gama de măsură ?  
 Q2: cât e clasa de precizie la măsurarea U ?  
 Q4: cât este rezoluția pe scara  $U_{CS} = 5V$ ?  
 comparați cu rezoluția aparatului analogic!



## Eroarea limită - expr. relativă

Același lucru, dar cu erorile maxime 1 și 2 sub formă relativă:

1.  $\epsilon_{\text{Raportată}} = C \rightarrow \epsilon_r = C X_{CS} / X \quad [\%]$
2.  $\epsilon_r = b \quad [\%]$  (notăm prin analogie cu C)

Eroarea **relativă limită** este suma erorilor datorate celor 2 cauze:

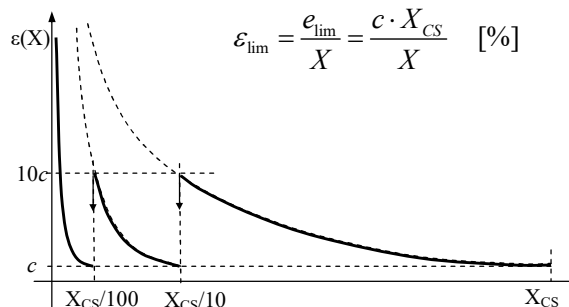
$$\epsilon_{r \text{ lim}} = C X_{CS} / X + b \quad [\%]$$

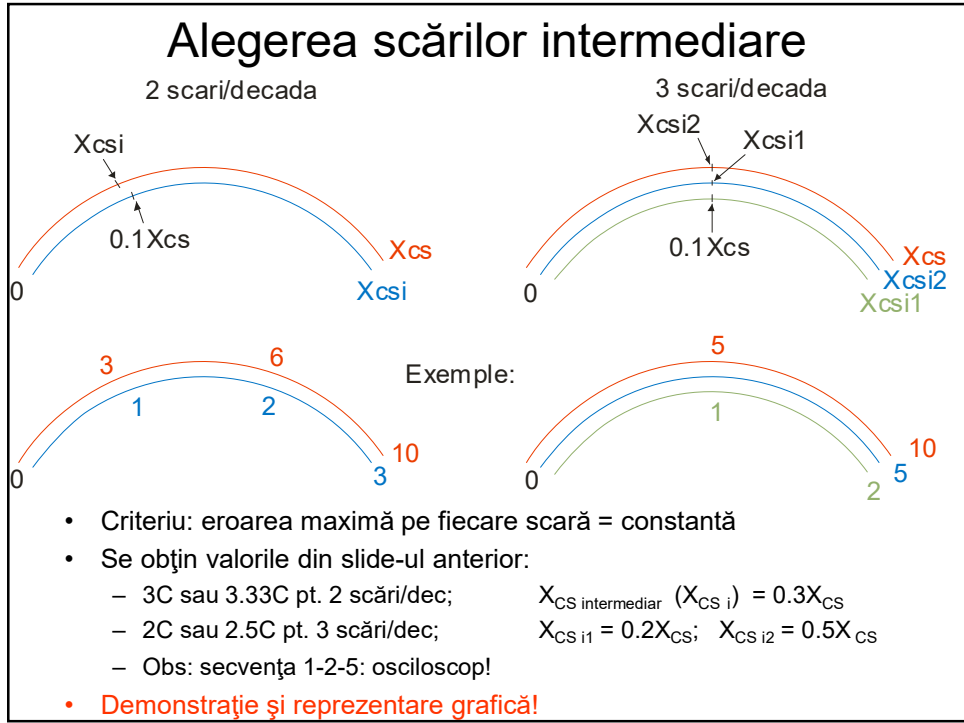
OBS1: uzual,  $b$  lipsește din prospectele aparatelor de precizie redusă ( $b \ll C \rightarrow b \approx 0$ )

OBS2: comparație *rom.* eroare - *engl.* accuracy; care denumire e mai corectă?

## Variația erorii relative în funcție de poziția în cadrul scării

- pt multe aparate, C este unica eroare specificată în prospect  $\rightarrow e_{\text{lim}} = CX_{CS}$
- eroarea rel. **minimă** pe o scară este C
- Q: **cît va fi cea maximă?**
- erori mai mici la măsurarea cît mai aproape de capul scării  $\rightarrow$  rolul operatorului în alegerea corectă (educată!) a scării de măsură ! (**regula 0-2**)
- eroarea rel. **maximă** depinde de nr. scări/decadă:
  - 1 scară/decadă: 10C (vezi figura)
  - 2 scări/decadă 3C sau 3.33C
  - 3 scări/decadă 2C sau 2.5C
- **Demonstrație!**





## Propagarea erorilor la măsurările indirecte

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

- Măsurare indirectă: se măsoară  $X_i$ , se calculează  $Y$  pe baza  $X_i$
- prin diferențiere, apoi trecerea la diferențe finite ( $d \rightarrow \Delta$ ) :

$$dY = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial X_i} dX_i \quad \Delta Y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial X_i} \Delta X_i$$

Se observă similitudinea dintre  $\Delta Y$  și expresia unei erori absolute

Q: ce semnificație are **modulul** ?

Indicație: regula 0-1 !

$$e_{\text{lim},Y} = |\Delta Y|_{\text{max}} = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial X_i} \Delta X_i \right|_{\text{max}} \leq \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial X_i} \right| |\Delta X_i|_{\text{max}}$$

## Propagarea erorilor la măsurările indirecte

trecem de la erori absolute la relative:

$$\varepsilon_{\text{lim},Y} = \frac{e_{\text{lim},Y}}{Y} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial X_i} \cdot \frac{X_i}{Y} \right| \cdot \frac{e_{\text{lim},i}}{X_i} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial X_i} \cdot \frac{X_i}{Y} \right| \cdot \varepsilon_{\text{lim},i}$$

Aplicație: se măsoară pe o rezistență  $U$  cu eroarea  $\varepsilon_{rU}$  și  $I$  cu  $\varepsilon_{rI}$ . Se calculează  $R=U/I$ .

Să se calculeze  $\varepsilon_{rR}$

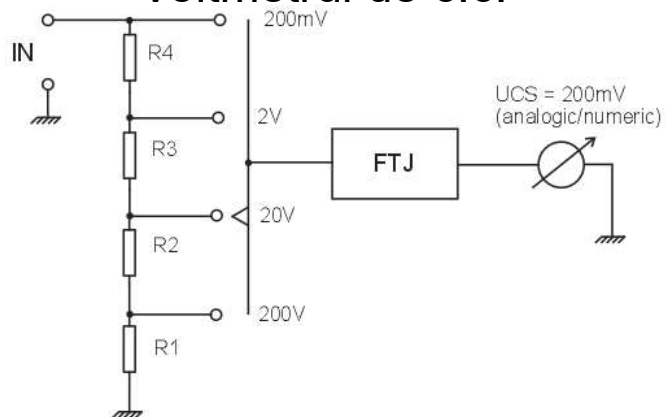
Răspuns:  $\varepsilon_{rR} = \varepsilon_{rU} + \varepsilon_{rI}$

Demonstrație !

## B. Măsurarea tensiunilor și curenților continui

- Voltmetrul de c.c.
  - analogic: cu instrument magnetoelectric
  - numeric: cu convertor Analog-Numeric (CAN sau ADC) – va fi studiat în anul 3
- Miliampermetrul de c.c.


### Voltmetrul de c.c.

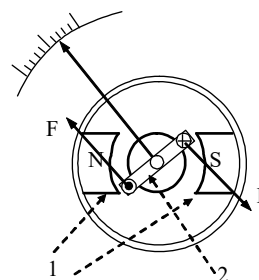


- R1 ... R4 = divizor de intrare; **dimensionare ?**
- comparație cu DCC osciloscop
- limitare:  $R_{\text{intrare instrument}} \gg R_{1,4}$  pentru a nu interveni în relația de divizare (în general nu se poate realiza la indicatoare analogice → vezi schemă particulară)
- FTJ opțional (rejecția semnalelor perturbatoare alternative)
- Instrumentul indicator: instrument cu ac/ v-metru numeric
- V-metru numeric: vezi curs IEM an 3



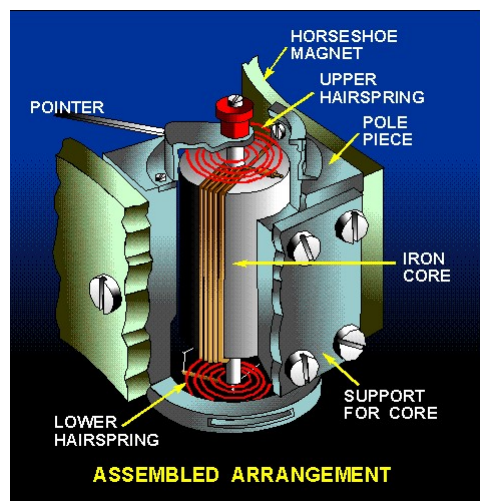
## Instrumentul magnetoelectric

- numit și instrumentul d'Arsonval
- simbol: 
- echipaj mobil: bobină mobilă + ac indicator
- bobină mobilă:  $n$  spire, suprafață  $A$
- magneți permanenți: inducție  $B$
- asupra unei spire de lungime  $l$  parcursă de curentul  $I$  acționează forța:
 
$$F = B \cdot I \cdot l$$
- cuplul activ ce acționează asupra bobinei:
 
$$M_a = nA \cdot BI$$
- cuplul rezistent este dat de un arc spiralat de constantă  $D$ :
 
$$M_r = D\alpha$$
- la echilibru  $M_a = M_r \rightarrow \alpha$  proporțional cu  $I$
- notând  $S$  sensibilitatea instrumentului:
 
$$\alpha = SI$$



1 – magneți permanenți  
2 – bobina mobilă

## Realizare



arcurile spirale (*hairsprings*) au și rolul de a conecta bobina mobilă la bornele fixe ale aparatului.

## Instrumentul magnetoelectric – cont'd

### Concluzii:

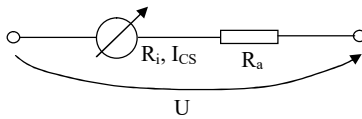
- răspuns liniar (deviație proporțională cu I)  
(OBS: există și instrumente cu deviația proporțională cu  $I^2$ , vor fi studiate ulterior)
- răspuns proporțional cu I nu U → Ampermetru și nu Voltmetru
- Q: se poate transforma în voltmetru?
- instrumentul are polaritate
- există cu 0 la stînga (de obicei gradate) sau cu 0 la mijloc (galvanometre, indicatoare de nul, uneori negradate)
- timp de răspuns: sute de ms... secunde
- echipaj mobil, timp de răspuns mic → inerție mică → ușor → sîrmă subțire → foarte sensibil → micro sau mili-ampermetru
- Q: cît indică în curent alternativ?
- Hint: datorită inerției, instrumentul face **medierea** tensiunii variabile aplicate

## Exemplu de instrument magnetoelectric



- simboluri: instrument magnetoelectric, poziție verticală, 2KV izolație, clasa de precizie 1%
- Q: cum se realizează o scară  $U_{CS} = 500V$  știind că deviația e proporțională cu curentul, așadar există un  $I_{CS}$  ?

## Utilizarea ca voltmetru



- Instrumentul:  $R_i, I_{CS}$
- Voltmetru: Dorim  $U_{CS}$
- Adăugăm **rezistența adițională**  $R_a$

$$U = (R_i + R_a)I \quad \rightarrow \quad U_{CS} = (R_i + R_a)I_{CS}$$

$$R_a = U_{CS}/I_{CS} - R_i$$

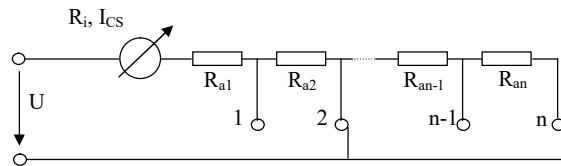
$$R_{tot} = R_a + R_i = U_{CS}/I_{CS}$$

- OBS: de obicei  $R_i \ll R_a$  deci  $R_{tot} \approx R_a$

## Sensibilitatea voltmetrului

- se specifică în prospect: nu  $R_i$  ci  $R_{tot}/U_{CS}$  [ $K\Omega/V$ ]
- este o măsură a sensibilității
- de obicei  $R_a \gg R_i$  deci  $R_{tot} \approx R_a$
- voltmetru ideal:  $R_{tot} = \text{infin}$ 
  - voltmetre industriale (de panou):  $< 10K\Omega/V$
  - voltmetre analogice de laborator: zeci de  $10K\Omega/V$
  - voltmetre numerice:  $\geq 1M\Omega/V$
- Aplicație: se dă un voltmetru cu  $U_{CS}=5V$  și  $10K\Omega/V$ . Să se proiecteze cu ajutorul său un voltmetru cu  $U_{CS}=500V$  ca în figură.
- Rezolvare?

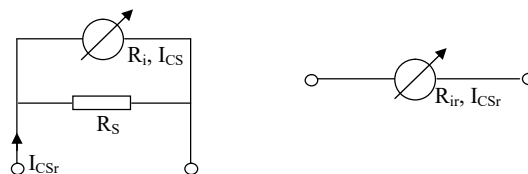
## Voltmetre cu mai multe scări



- Variantă a schemei generale
- Dimensionarea rezistențelor adiționale:  
pentru scara  $k$  ( $k=1..n$ ) se obține:

$$\sum_{i=1}^k R_{ai} = \frac{U_{CSk}}{I_{CS}} - R_i$$

## Folosirea ca ampermetru

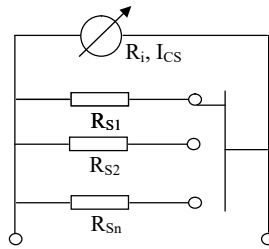


- în locul **rezistențelor adiționale**  $R_a$  se folosesc **șunturi**  $R_s$
- curentul prin instrument este de  $n$  ori mai mic decât curentul total:  $I_{CSr} = nI_{CS}$
- dimensionare, pe baza divizorului de curent:

$$\Rightarrow 1 = n \frac{R_s}{R_s + R_i} \Rightarrow R_s = \frac{R_i}{n-1} \quad I_{CS} = I_{CSr} \frac{R_s}{R_s + R_i}$$

- rezistența echivalentă văzută la borne:  $R_{ir} = \frac{R_i R_s}{R_i + R_s} = \frac{R_i}{n}$

## Instrumente cu mai multe scări



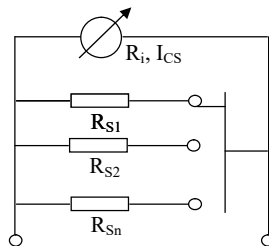
- Mai multe șunturi individuale
- căderea de tensiune e aceeași indiferent de scară:

$$U_{CS} = R_i \cdot I_{CS}$$

- dimensionare: pentru scara  $k$ :

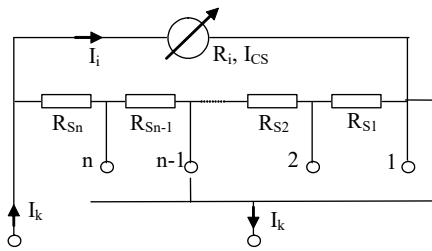
$$R_{Sk} = \frac{R_i}{n_k - 1}$$

## Instrumente cu mai multe scări – cont'd



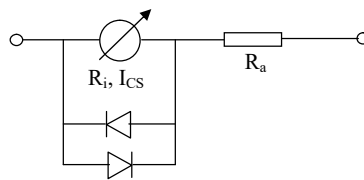
- dezavantaj șunturi **individuale**:
  - se știe  $R_{sk} \ll R_i$
  - dacă comutatorul nu face contact cu nici o rezistență în scurtul moment al comutării →
  - tot curentul trece prin  $R_i$
  - instrumentul se arde
- soluție: comutator “*make before break*”
- probleme de fiabilitate

## Instrumente cu mai multe scări – cont'd



- soluție: șuntul **universal**:
- condiție similară cu relația precedentă  $R_s = R_i / (n-1)$
- pe fiecare scară  $k=1..n$  trebuie să avem  $\sum R = R_s$  :
  - scara 1:  $R_s = R_{s1} + R_{s2} + \dots + R_{sn}$
  - scara 2:  $R_s = R_{s2} + \dots + R_{sn}$
  - scara n:  $R_s = R_{sn}$
- **dezavantaj**: calcul mai dificil (relații interdependente)
- **avantaj**: risc de defectare mai mic
- există în continuare pericolul defectării, dar mai redus (cînd comutatorul nu face contact cu nici un plot → scara cea mai sensibilă)

## Protecția aparatului magnetoelectric



- elimină riscul defectării
- cele 2 diode limitează tensiunea pe instrument la cca. 0.7V
- pentru tensiuni mai mari una din diode se deschide, șuntînd instrumentul
- $R_a$  preia diferența de cădere de tensiune

## C. Măsurarea tensiunilor alternative

### Parametrii semnalelor periodice

- semnal periodic:  $u(t) = u(t+KT)$ ,  $T$ =perioada
- necesitatea definirii **valorilor particulare** ale  $u(t)$ :
  - $u(t)$  variabil în timp – **ce valoare va indica aparatul ?**
- 1. Valoarea de vîrf:  
 $U_{V+} / U_{V-} = \max(u(t)) / \min(u(t))$  pe o perioadă
- 2. Valoarea vîrf-la-vîrf:  
 $U_{VV} = U_{V+} + |U_{V-}|$   
**Q: cînd se preferă valoarea  $U_{VV}$  față de  $U_V$  ?**
- 3. Valoarea medie:  
$$\overline{u(t)} = U_0 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(t) dt$$
  - este componenta continuă a semnalului
  - inutilă pentru semnalele simetrice
  - se preferă valoarea medie absolută

## Parametrii semnalelor periodice (cont'd)

4. Valoarea medie absolută – redresare d.a.

$$U_m = \overline{|u(t)|} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} |u(t)| dt$$

4'. Valoarea medie absolută – redresare m.a.

– semialternanța pozitivă:

$$u_+(t) = \frac{1}{2}(u(t) + |u(t)|) \Rightarrow U_{m+} = \overline{u_+(t)}$$

– semialternanța negativă:

$$u_-(t) = \frac{1}{2}(u(t) - |u(t)|) \Rightarrow U_{m-} = \overline{u_-(t)}$$

- Q: avantaje/dezavantaje redresare d.a. față de m.a ?
- Q: scheme de redresoare?

## Parametrii semnalelor periodice (cont'd)

5. Valoarea efectivă/eficace/RMS (*root mean squared*)

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} x^2(t) dt} = \sqrt{\overline{x^2(t)}}$$

- definiție: valoarea efectivă a unei tensiuni alternative este egală cu valoarea unei tensiuni continue care dezvoltă aceeași putere ca tensiunea alternativă respectivă printr-o rezistență dată.
- utilitate ? popularitate ?
- toate aparatele de măsură de c.a. sînt **gradate în valori efective pentru semnal sinusoidal**



## Importanța formei semnalului

Factorul de formă FF sau  $K_F$ :

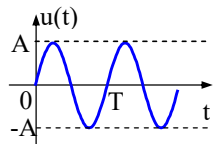
Factorul de vîrf/de creastă FV sau FC sau  $K_V$ :

$$FF = U_{ef} / U_{ma}$$

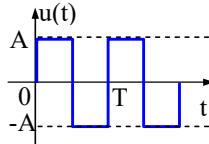
$$FC = U_V / U_{ef}$$

Semnal	FF (d.a.)	FF (m.a.)	FC
a)	1.11	2.22	$\sqrt{2}$
b)	1	2	1
c)	$2 / \sqrt{3}$	$4 / \sqrt{3}$	$\sqrt{3}$

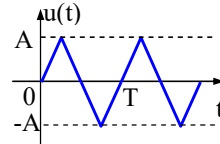
demonstrație!



a) Semnal sinusoidal



b) Semnal dreptunghiular simetric

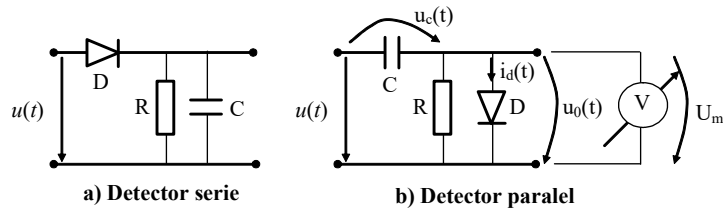


c). Semnal triunghiular simetric

## Voltmetre de c.a.

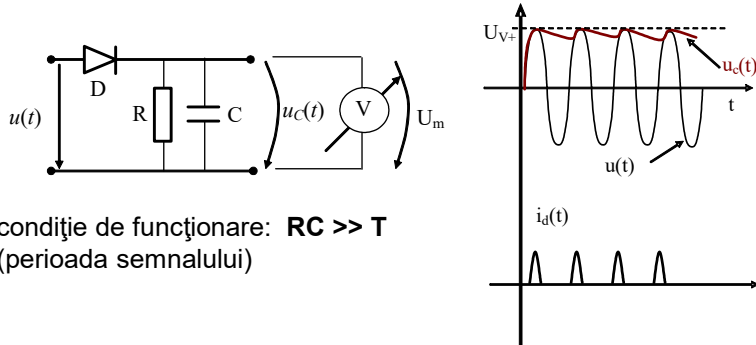
- Valori particulare:
  1. De vîrf
  2. Vîrf-la-vîrf
  3. Medie absolută
  4. Efectivă
- Voltmetre
  1. De valori de vîrf
  2. De valori vîrf-la-vîrf
  3. De valori medii absolute
  4. De valori efective
- Voltmetrul de c.a. e compus din:
  - un **detector** de una din cele 4 valori  
 Q: ce este un detector?
  - Instrument indicator analogic/numeric care afișează (indică) valoarea respectivă

# 1. Voltmetre de valori de vîrf



- s.n. și detectoare de vîrf DV
- mărimea indicată la ieșire de către DV trebuie să fie valoarea de vîrf

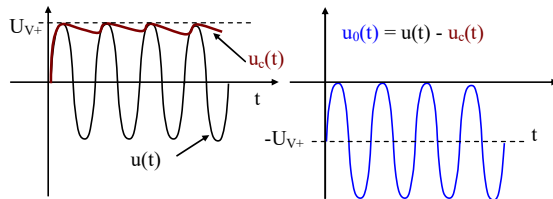
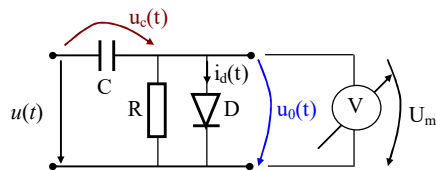
## Detectorul de vîrf serie



condiție de funcționare:  $RC \gg T$   
(perioada semnalului)

- $i_d(t) > 0$  doar în timpul (scurt) al încărcării C
- datorită  $i_d(t)$  care durează  $\ll T$  s.n. *detector clasă C*
- **Q:** desenați f.u. la intrare și ieșire în cazul cu comp. continuă!
- componenta continuă se regăsește la ieșire → impropriu pentru un voltmetru de c.a. → se folosește mai mult la detecția semnalelor RF
- $u_c(t) = U_{V+}$   
→ la ieșire avem  $U_m$  (măsurat) = tens. continuă egală cu  $U_{V+}$
- consecință: la ieșire se poate cupla un aparat magnetoelectric, numeric sau *orice* aparat de c.c.

## Detectorul de vîrf paralel



Sensul axării = sensul diodei  
(dioda în jos = semnalul se află sub axă)

$$u_C(t) = U_{V+}$$

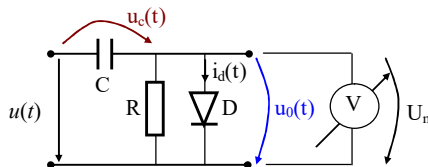
(similar det. serie;  $RC \gg T$ )

$$u_0(t) = u(t) - u_C(t)$$

$$= u(t) - U_{V+}$$

- semnalul  $u(t)$  (variabil) este **translatat în jos** cu  $U_{V+}$
- se numește că semnalul este **axat** (indiferent de c.c. el este pus cu vîrf pe axă)
- **obs. foarte importantă:  $u_0(t)$  este o tensiune variabilă**
- $U_m = E(u(t) - U_{V+})$   
 $= E(u(t)) - E(U_{V+})$   
 $= 0 - U_{V+}$
- mărimea indicată este valoarea de vf. → QED

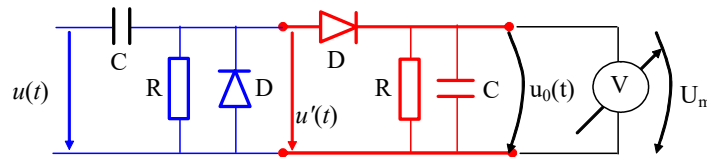
## Detectorul de vîrf paralel (cont'd)



Concluzii:

- $u_0(t)$  variabil
- $U_m$  constant datorită medierii – efectul instrumentului magnetoelectric
- $U_m = -U_{V+}$
- DV serie **poate funcționa** cu orice aparat la ieșire (inclusiv osciloscop), pt. că tensiunea de ieșire este continuă
- DV paralel **nu poate funcționa** decât cu un instrument care face mediere la ieșire, pt. că tensiunea de ieșire este variabilă
- DV serie este **un circuit complet**
- DV paralel face  $\frac{1}{2}$  din "treabă", instrumentul magnetoelectric de la ieșire face restul de  $\frac{1}{2}$  (medierea)

## 2. Voltmetre de valori vîrf-la-vîrf



- se cascadează un DV paralel cu un DV serie
- atenție la sensurile diodelor!

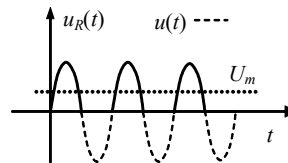
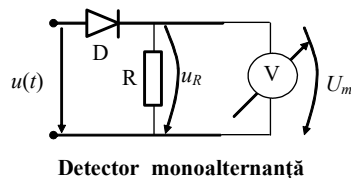
- $u_0(t) = U_V (u'(t)) = U_V (u(t) \text{ axat})$
- $u(t) \text{ axat} = 0 \dots 2U$
- $u_0(t) = U_{VV}(u(t))$

OBS: tensiunea de ieșire continuă → nu contează tipul instrumentului indicator

Q1: desenați formele de undă  $u(t)$ ,  $u'(t)$ ,  $u_0(t)$

Q2: redesenați schema și f.u. dacă se dorește vîrf negativ!

## 3. Voltmetre de valori medii absolute

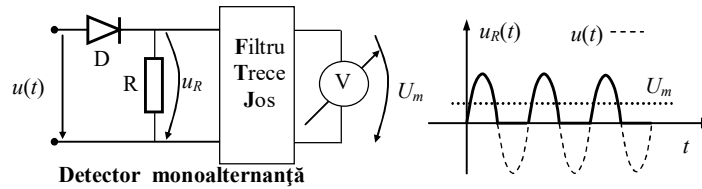


- Detectorul m.a. este cel mai simplu detector
- R poate fi inclus în  $R_i$

Q: avantaje/dezavantaje monoalternanță în cazul unui redresor și în cazul unui detector?

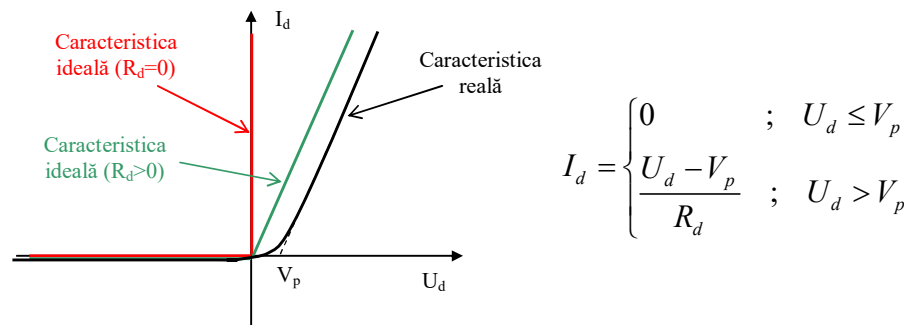
- și în acest caz, la intrarea în instrument tensiunea este variabilă
- instrumentul **trebuie** să facă mediere (inst. magnetoelectric)

## Variantă voltmetru de valori m.a.



- FTJ = mediere
- la ieșire avem componenta continuă (medie)  $U_m$   
→ se poate folosi *orice fel* de instrument, nu numai cel magnetoelectric

## Problemele detectoarelor cu diodă













- dioda reală: cădere de tensiune  $V_p = 0.2 \dots 0.7V$ 
  - $V_p$  depinde de tipul și tehnologia diodei
  - $R_d$  este o rezistență *dinamică*
  - pentru tensiuni  $U_d \gg V_p$  comportamentul este aproximativ linear ( $U_{\text{măsurat}} = U_{\text{real}} - V_p$ )
  - pentru tensiuni de ordinul 1...3V comportamentul este nelinier (pt. aparatele analogice cu ac se poate desena o scară neliniară)
  - pentru tensiuni  $< 1V$  nu se pot folosi aceste scheme (trebuie amplificator) – vezi curs IEM an 3

## 4. Voltmetre de valori efective

- Cel mai “dorit” voltmetru în 99% din cazuri.
- Variante de realizare:
  - a) instrumente cu ac, care indică valoarea efectivă
  - b) cu înmulțitor analogic
  - c) prin efect termic
  - d) cu digitizor și calcul numeric (vezi curs IEM an 3)

### a. Instrumente care indică v. efectivă

Există și alte instrumente în afara celui magnetoelectric:

Tipul mecanismului	Semnul grafic	Banda de frecvențe
1a. Magnetoelectric cu bobină mobilă		numai în c.c. (0 Hz)
1b. Magnetoelectric cu redresor		10Hz – 10 kHz
1c. Magnetoelectric cu termocuplu		0 – 100 MHz
1d. Magnetoelectric cu magnet mobil și bobină fixă		numai în c.c. (0 Hz)
2. Feromagnetic		0 – 1000 Hz
3. Electrodinamic		0 – 1000 Hz
4. Ferodinamic		0 – 100 kHz
5. Cu inducție		10 – 100 Hz
6. Electrostatic		0 – 10 MHz
7. Cu lamelă bimetalică		0 – 50 kHz

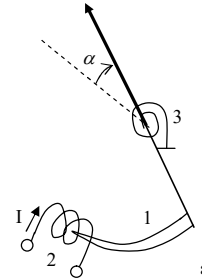
reamintim că instr. magnetoelectric **nu** indică val. efectivă!

## a. Instrumente care indică v. efectivă

### Instrumentul feromagnetic

- Armătura feromagnetică (1) solidară cu echipajul mobil
- Bobina fixă (2)
- Arcul spiralat (3) – nu mai e parcurs de curent

- Se obține dependența:  $\alpha = SI^2$   
dependența pătratică = putere = valoare efectivă a tensiunii/curentului (cu scară neliniară)



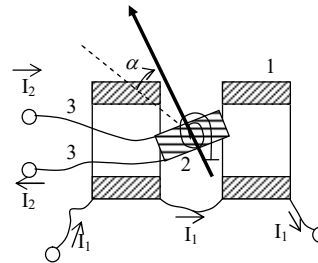
- Avantaje:
  - răspunde proporțional cu v. ef. → funcționează în c.a. fără nici un detector
  - bobina fixă → aparat mai robust
- Dezavantaje
  - sensibilitate redusă → nu se folosește în electronică ci doar ca aparate de panou, industriale, etc.

## a. Instrumente care indică v. efectivă

### Instrumentul electrodinamic

- bobină fixă+bobină mobilă
- Se obține dependența:  $\alpha = SI_1I_2$
- Prin legarea bobinelor în serie se obține

$$\alpha = SI^2 \quad (I=I_1=I_2)$$



OBS: se poate obține un wattmetru dacă cele 2 bobine măsoară respectiv U și I

Avantaje/dezavantaje: idem instrumentul feromagnetic (minus robustețea)

## a. Instrumente care indică v. efectivă

### Instrumentul electrostatic

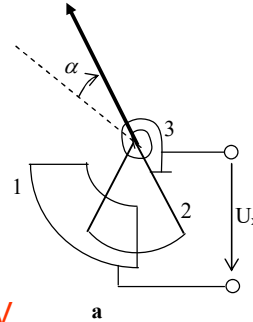
- armătură fixă+armătură mobilă
- Se obține dependența:  $\alpha = SU_x^2$

Avantaje/dezavantaje: idem instrumentul feromagnetic

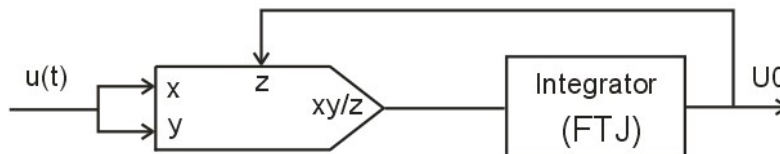
Caracteristică: sensibilitate mică;  $U_{CS} > 100V$

Aplicații:

- emițătoare radio/TV
- dispozitive cu tuburi electronice
- alte dispozitive cu U mari
- nu se folosește în instr. de laborator



## b. Voltmetre cu înmulțitor analogic



- înmulțitor cu 3 intrări, integrator: componente electronice (active)

$$U_0^2 = \overline{u^2(t)} \quad \text{deci } U_0 = U_{ef}(u(t))$$

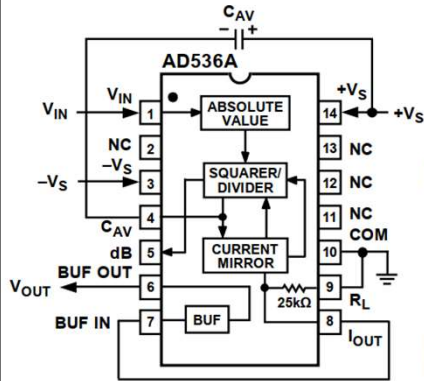
Demonstrație !

- precizia: 0.5 – 1%
- $f_{max} = \text{MHz}$
- folosit în multimetre electronice de laborator (nu aparate de panou)



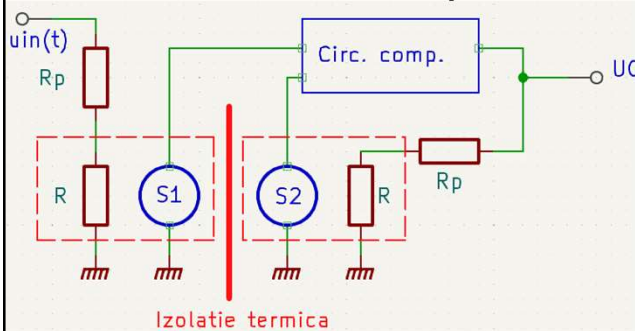
## b. Voltmetre cu înmulțitor analogic

- $U_0^2 = U_{RMS}^2 = \text{Avg}[u_{IN}^2(t)]$
- Funcția este îndeplinită de circuitul înmulțitor analogic, numit și *squarer/divider*
- Exemplu: circuit integrat Analog Devices AD536 utilizat în multimetrul de laborator GW-Instek GDM8245



- Alt exemplu: circuit integrat Analog Devices AD737 utilizat în multimetrele Fluke 7x, 17x
- În general multimetrele *True RMS* conțin un astfel de circuit.

## c. Voltmetre prin efect termic



- R: rezistențe de încălzire
- $R_p$ : rezistențe de protecție
- $S_{1,2}$ : surse cu tensiunile proporționale cu temperaturile pe cele 2 rezistențe R (termocuple)

- *Circ. comp.* compară tensiunile  $S_1, S_2$  și ajustează  $U_0$  (ieșirea)  
 $\rightarrow$  se modifică temperatura  $t_2$  a.î.  $t_1=t_2 \rightarrow U_{S2}=U_{S1}$   
 $\rightarrow$  puterile  $P_1=P_2$
- izolatorul termic: ne-influențarea reciprocă a surselor
- se obține  $U_0=U_{ef}(u(t))$  **Demonstrație !**

## Concluzii V-metre de v. efective

- toate V-metrele uzuale sînt gradate în valori efective
- doar V-metrele din categoria 4 măsoară valoarea efectivă
- Q: cum gradăm voltmetrele 1,2,3 în valori efective cînd ele indică de fapt valori de vîrf/V-V/medii ?
- Hint: voltmetrele din categoria 4 sînt cele mai scumpe (comparați complexitatea schemelor față de o simplă diodă)

## Concluzii V-metre de v. efective (cont'd)

- Q: cum gradăm voltmetrele 1,2,3 în valori efective cînd ele indică de fapt valori de vîrf/V-V/medii ?
- A: folosim relațiile între valori:
$$FF = U_{ef}/U_{ma}, \quad FC = U_V/U_{ef}$$
- Ex. 1: folosim v-metru de m.a. (tipul 3), dorim indicarea  $U_{ef}$   
 $\rightarrow U_{ef} = FF \cdot U_{ma}$
- Ex. 2: folosim v-metru de vf. (tipul 1), dorim indicarea  $U_{ef}$   
 $\rightarrow U_{ef} = U_V/FC$
- Concluzie: obținem  $U_{ef}$  din orice valoare disponibilă; includem corecția cu FF sau FC cînd calibrăm instrumentul
- Q: de ce mai avem nevoie de tipul (4) – cel mai scump?
- Hint: forma semnalului ?

## Concluzii V-metre de v. efective (cont'd)

- FF, FC sînt dependente de forma semnalului (vezi tab.)
- V-metru de valori ef. ieftin: măsurăm  $U_{ma}$  și indicăm  $U_{ef}=U_{ma}FF$
- FF calc. pt. semnal sinusoidal → funcționează numai pentru semnal sinusoidal;
- $FF_{dreptunghi} \neq FF_{sinus}$  → indicație eronată pentru semnal dreptunghiular
- pt. indicarea corectă a s.dreptunghiular → calibrare cu  $FF_{dreptunghi}$  (neuzual)
- Concluzie: doar V-metrele de tipul (4) indică  $U_{ef}$  pentru **orice** tip de semnal
- V-metrele de tipul (4): marcate **TRUE RMS** sau **RMS RESPONDING**, mai scumpe
- dacă nu există acest marcaj, sînt de tipul (1,2,3); indică corect doar pt semnal sinusoidal; sînt mai ieftine

## Concluzii V-metre de v. efective (cont'd)

- **Aplicație 1:**

Se măsoară o tensiune triunghiulară simetrică de amplitudine  $U$  cu un V-metru gradat în valori efective pentru semnal sinusoidal, realizat folosind un instrument magnetoelectric și redresor d.a.

Să se calculeze:

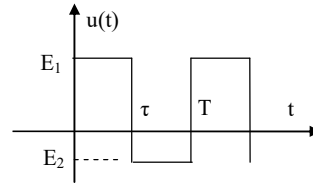
- a) valoarea indicată
- b) eroarea sistematică

**Rezolvare!**

## Concluzii V-metre de v. efective (cont'd)

- **Aplicație 2:**

Cu un voltmetru magnetoelectric având scări pentru măsurarea tensiunilor continue și alternative, cu redresor d.a., se fac următoarele măsurători pentru tensiunea periodică din figură:



- pe scara de curent continuu se măsoară  $U_1=4V$ ;
- pe scara de curent alternativ se măsoară  $U_2=7,77V$ .

a) Știind că pe scara de curent alternativ voltmetrul este etalonat în valori efective pentru semnal sinusoidal, să se calculeze tensiunile  $E_1$  și  $E_2$  dacă valoarea lui  $\tau=T/2$ .

b) Ce va indica voltmetrul în cele două cazuri dacă  $\tau=T/3$  ?

**Rezolvare !**

## Unități de măsură relative

- decibelul:

$$U_1/U_0 \text{ [dB]} = 20 \lg U_1/U_0$$

transformare în unitate de măsură **absolută**:

se impune  $U_0 = ct = U_{ref}$

Exemple:

- $U_{ref} = 1V \rightarrow \text{dBV}$

- $U_{ref} = 1\mu V \rightarrow \text{dB}\mu V$

- $U_{ref} = 0.775V \rightarrow \text{dBm}$

(1 dBm = tensiunea care produce o putere de 1mW/600Ω)

OBS: în dBm vom măsura, în continuare, *tensiuni* și nu puteri!

OBS2: în dBm putem măsura și puteri cu  $P_{ref} = 1mW$  !